

mars 2014

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4318

²²⁶₈₈Ra

Radium-226

▷ Émissions principales (radium-226 avec ses descendants) :

α : de 4,6 à 7,7 MeV

β : E_{\max} de 0,7 à 3,3 MeV

γ (tous les X sont de plus faibles énergies) : de 0,4 à 2,5 MeV

- ▷ Période physique : 1 600 ans
- ▷ Seuils d'exemption : Ra-226 à l'équilibre radioactif avec ses descendants : 10^4 Bq, 10 Bq/g
- ▷ Organes critiques en termes de dose efficace : poumons, moelle osseuse, surface osseuse
- ▷ Surveillance d'ambiance : mesures de débit d'équivalent de dose ambiant
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition externe : dosimétrie passive (poitrine et extrémités)
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : analyse radiotoxicologique des urines

Découvert en 1898 par Pierre et Marie Curie, le radium est un métal alcalino-terreux qui ne possède aucun isotope stable. Il est de couleur blanc brillant mais noircit lors de son exposition à l'air libre. Le radium n'existe pas à l'état pur. Il se combine immédiatement et se décompose dans l'eau par formation d'hydroxyde de radium. Sa température de fusion est de 696 °C et sa température d'ébullition de 1 737 °C.

Dans cette fiche, on distingue le radium-226 seul (ci-après dénommé Ra-226 seul) du radium-226 à l'équilibre avec ses descendants (ci-après dénommé Ra-226 à l'équilibre). La période radioactive du radium-226 (1 600 ans) étant longue par rapport à celles de ses proches descendants (²²²Rn, ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po), leurs activités s'égalisent rapidement (~ 30 jours) avec celle du radium-226 dans un volume étanche. En effet, le premier descendant étant un gaz, cet équilibre radioactif ne peut s'établir que dans un espace confiné. En pratique, dans un tel volume, le radium-226 initialement seul ne peut plus être considéré comme tel au-delà de 1 jour. Après ~ 200 ans, toujours dans ces conditions, tous les descendants (+ ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi, ²¹⁰Po) sont à l'équilibre radioactif : dans ce cas, 1 Bq de radium-226 engendre une activité totale de 9 Bq. En pratique, après 60 ans, on peut admettre que le radium est à l'équilibre (cas majorant pour la radioprotection).

Cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides essentiellement en sources non scellées.

L'objectif n'est pas de se substituer à la réglementation en vigueur, mais d'en faciliter la mise en œuvre en réunissant sur un support unique, pour chaque radionucléide, les informations les plus pertinentes ainsi que les bonnes pratiques de prévention à mettre en œuvre.

Ces fiches sont réalisées à l'intention des personnes en charge de la radioprotection : utilisateurs, personnes compétentes en radioprotection, médecins du travail.

Sous ces aspects, chaque fiche traite :

- 1. des propriétés radiophysiques et biologiques,*
- 2. des utilisations principales,*
- 3. des paramètres dosimétriques,*
- 4. du mesurage,*
- 5. des moyens de protection,*
- 6. de la délimitation et du contrôle des locaux,*
- 7. du classement, de la formation et de la surveillance du personnel,*
- 8. des effluents et déchets,*
- 9. des procédures administratives d'autorisation et déclaration,*
- 10. du transport,*
- 11. de la conduite à tenir en cas d'incident ou d'accident.*

Le radium-226 seul induit principalement un risque d'exposition aux rayonnements alpha tandis que la présence de ses descendants induit un risque d'exposition à des émetteurs alpha, bêta et gamma.

Le radium n'étant plus utilisé aujourd'hui en France, les seuls postes de travail sont ceux liés à des situations héritées du passé (récupération d'objets au radium, gestion de sites pollués...). Lorsque de telles situations sont rencontrées, il convient de faire appel à des intervenants spécialisés (pompiers, IRSN).

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le radium-226 appartient à la famille radioactive de l'uranium-238. Il est présent dans les sols à raison de 1 g de radium en moyenne pour 3 tonnes d'uranium.

Propriétés radiophysiques

Le radium-226 a une période radioactive de 1 600 ans et une activité massique de $3,7 \times 10^{10}$ Bq/g (1 Ci/g).

Le radium-226 est un émetteur de particules alpha. La transition nucléaire (désintégration) est accompagnée par l'émission d'électrons et de rayonnements X et gamma. Le *tableau I* présente les émissions d'énergie supérieure à 1 keV dont le pourcentage est supérieur à 1%.

▽ Principales émissions du radium-226 seul **Tableau I**

Principales émissions	Énergie (keV)	Pourcentage d'émission (%)
Alpha	4601	5,5
	4784	94
Électrons	21	2,4
Gamma	186	3,6

La filiation du radium-226 comprend neuf radionucléides (*tableau II*). Sa désintégration est suivie par une succession d'émissions de rayonnements alpha, bêta et X-gamma, dont des rayonnements β et γ d'énergies élevées, pour aboutir au plomb-206 stable.

Parmi les descendants du radium-226, on note le radon-222 ($^{222}_{86}\text{Rn}$; période = 3,8 j), gaz émetteur alpha.

▽ Filiation du radium-226 **Tableau II**

Produits de filiation	radon-222, polonium-218, plomb-214, bismuth-214, polonium-214, plomb-210, bismuth-210, polonium-210, plomb-206 (stable)
Équations	$^{226}_{88}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} ^{222}_{86}\text{Rn} \xrightarrow{\alpha} ^{218}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{214}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^-} ^{214}_{83}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{214}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{210}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^-} ^{210}_{83}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{210}_{84}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} ^{206}_{82}\text{Pb}$

Les cinq premiers isotopes qui suivent la désintégration alpha du radium-226 ont des périodes courtes. Dans un milieu confiné, leurs activités deviennent rapidement (environ 30 jours) sensiblement égales à celle du père (équilibre radioactif). La période du plomb-210 étant de 22 ans, il faut attendre environ 200 ans pour que les trois derniers isotopes soient eux aussi à l'équilibre.

Le *tableau II bis* présente les principales émissions (énergie ≥ 200 keV, pourcentage $\geq 10\%$) du radium-226 à l'équilibre.

▽ Principales émissions du radium-226 à l'équilibre **Tableau II bis**

Principales émissions	Énergie (keV)	Pourcentage d'émission (%)
Alpha	4784	94
	5304	~ 100
	5490	~ 100
	6002	~ 100
	7687	100
Bêta (E_{max})	667	47
	724	41
	1162	100
	1508	17
	1542	18
	3272	18
Gamma (tous les X sont de plus faibles énergies)	352	38
	609	46
	1120	15
	1764	15

Propriétés biologiques du radium-226

Pour l'inhalation, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), à partir de données humaines et animales, recommande pour le radium-226 le type M (absorption moyenne) pour tous les composés.

Après ingestion, 20% environ de l'activité ingérée de radium-226 passe dans la circulation sanguine.

Une fois transféré au sang, le radium-226, dont le comportement s'apparente à celui du calcium, se distribue dans tout l'organisme. Tandis que la majeure partie est éliminée dans les selles, une partie est retenue principalement dans le squelette, et à moindre degré dans le foie. La quantité retenue par l'os diminue très lentement avec le temps.

Le radium-226 incorporé est excrété par voie urinaire et fécale.

2. UTILISATIONS

Sauf éventuellement en recherche, le radium n'est actuellement plus utilisé.

Toutefois, le radium-226 a été abondamment employé dans des applications industrielles et artisanales (principalement fabrication et manipulation de montres ou réveils, fontaines

à radium, paratonnerres...), en médecine (principalement brachythérapie avec des aiguilles de radium) et en recherche. Ces applications imposent aujourd'hui encore de gérer la reprise des objets concernés ou de traiter les sites historiques pollués par ces activités.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe

Note préalable : Les données dosimétriques ci-après sont obtenues par calcul, en l'absence de toute protection.

Les tableaux suivants donnent pour une activité de 1 MBq de radium-226, seul et à l'équilibre, le débit d'équivalent de dose, exprimé en $\mu\text{Sv/h}$, en fonction de la distance, dans la configuration d'une source ponctuelle (tableaux III et IV) et celle d'un flacon de verre rempli au tiers de solution et fermé (tableaux V et VI). Les grandeurs $\dot{H}_p(0,07)$ et $\dot{H}_p(10)$ correspondent respectivement aux débits d'équivalent de dose à la peau et au corps entier ; ils ont été calculés avec un code Monte-Carlo (MCNPX). Les valeurs inférieures à $1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ n'ont pas été reportées (inférieures au bruit de fond naturel).

▽ Source ponctuelle (Ra-226 seul)

Tableau III

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$7,4 \times 10^1$	$1,7 \times 10^0$	$< 1 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

▽ Source ponctuelle (Ra-226 à l'équilibre)

Tableau IV

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$6,2 \times 10^3$	$6,5 \times 10^2$	$2,6 \times 10^1$
$\dot{H}_p(10)$	$3,7 \times 10^1$	$4,1 \times 10^0$	$3,4 \times 10^{-1}$

▽ Flacon (10 mL) en verre standard rempli au tiers (Ra-226 seul)

Tableau V

	Débit d'équivalent de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq	
	Tenu en main	Sous le flacon	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$8,3 \times 10^0$	$1,3 \times 10^1$	$1,3 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽¹⁾	Sans objet ⁽¹⁾	$1,4 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

▽ Flacon (10 mL) en verre standard rempli au tiers (Ra-226 à l'équilibre)

Tableau VI

	Débit d'équivalent de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq	
	Tenu en main	Sous le flacon	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$5,3 \times 10^3$	$8,1 \times 10^3$	$9,2 \times 10^0$	$7,8 \times 10^{-1}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽¹⁾	Sans objet ⁽¹⁾	$3,1 \times 10^0$	$2,8 \times 10^{-1}$

(1) Pour l'exposition des mains tenant la source, seule la valeur $\dot{H}_p(0,07)$ est pertinente.

Contamination cutanée

Un dépôt uniforme sur la peau de 1 Bq par cm^2 délivre un débit d'équivalent de dose à la peau [$\dot{H}_p(0,07)$] égal à $4,4 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ pour le radium-226 seul, et à $5,7 \mu\text{Sv/h}$ pour le radium-226 à l'équilibre.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

Le tableau VII donne les valeurs de dose efficace engagée, en μSv , correspondant à une activité incorporée de 1 Bq de radium-226 seul. Le tableau VIII présente la dose efficace engagée pour une incorporation de 1 Bq de radium-226 vieux de 10 ans et à l'équilibre (> 200 ans).

▽ Dose efficace engagée sur 50 ans à la suite d'incorporation de 1 Bq de radium-226 seul (DPU) pour les travailleurs de plus de 18 ans pour l'inhalation et l'ingestion (valeurs réglementaires) **Tableau VII**

Forme	Inhalation de 1 Bq (par défaut aérosol de 5 μm)		Ingestion de 1 Bq	
	Type	Dose efficace engagée (μSv)	f_1	Dose efficace engagée (μSv)
Tous composés	M	$2,2 \times 10^0$	0,2	$2,8 \times 10^{-1}$

Le facteur f_1 indique quelle fraction de la radioactivité présente dans l'intestin grêle passe dans le sang. Il caractérise l'absorption gastro-intestinale des composés ; dans le cas du radium-226, il est pris égal à 0,2 pour tous les composés.

Selon la modélisation de la CIPR, les organes contribuant principalement à la dose efficace (contribution $\geq 10\%$) sont les suivants :

- après inhalation : poumon (93%) ;
- après ingestion : moelle osseuse (38%), surface osseuse (44%).

▽ Dose efficace engagée sur 50 ans à la suite d'incorporation de 1 Bq de radium-226 vieux de 10 ans et à l'équilibre (> 200 ans) pour les travailleurs de plus de 18 ans, en prenant en compte tant pour l'inhalation que pour l'ingestion la DPU la plus élevée de chacun des descendants **Tableau VIII**

Âge de la source	Inhalation de 1 Bq (aérosol de 5 μm)	Ingestion de 1 Bq
	Dose efficace engagée (μSv)	Dose efficace engagée (μSv)
10 ans	$3,1 \times 10^0$	$5,2 \times 10^{-1}$
> 200 ans	$5,6 \times 10^0$	$1,2 \times 10^0$

Les modes d'incorporation classiques considérés dans les tableaux VII et VIII ne permettent pas de couvrir des situations accidentelles telles qu'une blessure, une piqûre ou une brûlure au cours desquelles le radionucléide passe directement dans le sang. Ces situations nécessitent une évaluation par des experts.

Exposition interne due à une contamination chronique

Selon la CIPR, l'exposition chronique est considérée comme une succession d'expositions aiguës ; en conséquence, pour une incorporation d'1 Bq/jour pendant n jours, multiplier les valeurs précédentes par n (hypothèse linéaire).

4. DÉTECTION ET MESURES

Le *tableau IX* résume les techniques de surveillance de l'exposition au radium-226. À noter que des mesures par spectrométrie gamma peuvent être utilement mises en œuvre pour confirmer la présence de radium-226 en cas de doute.

Techniques de surveillance

Tableau IX

	Appareil de mesure
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)	Radiamètre
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	Frottis + échelle de comptage
Recherche de petits foyers de contamination	ou contaminamètre (α ou β)
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	Prélèvement sur filtre et analyse en laboratoire (spectrométrie γ voire α)

Mesure du débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)

L'émission photonique du radium-226 seul est une raie à 186 keV de 3-4% d'intensité. Cependant, plusieurs proches descendants du radium-226 émettent des rayonnements gamma plus énergétiques et plus intenses qui sont détectables dans une approche qualitative. Il convient de s'assurer que la gamme en énergie de l'appareil utilisé couvre bien ces raies gamma énergétiques.

Mesure de la contamination surfacique (Bq/cm^2) et de petits foyers de contamination

En pratique, l'évaluation quantitative de la contamination surfacique du radium-226 est délicate compte tenu du bruit de fond ambiant et de l'incertitude quant à son équilibre avec ses descendants.

La détection d'une contamination surfacique en radium-226 peut être réalisée :

- soit directement au moyen d'un contaminamètre α . On peut également détecter les descendants du radium-226 avec un contaminamètre β ;
- soit indirectement par frottis (dont le taux de comptage est mesuré avec une échelle de comptage) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions du prélèvement. La technique du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur

précise de rendement. Dans le cas où celui-ci ne peut pas être évalué, il est suggéré de retenir la valeur de 10% indiquée dans la norme NF-ISO 7503-1⁽²⁾.

Relation entre le taux de comptage et l'activité surfacique

$$As = \frac{n}{Rd \times S \times K}$$

où

- As** est l'activité surfacique en Bq/cm^2
- n** est le taux de comptage en impulsions par seconde après soustraction du bruit de fond
- Rd** est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π)
- S** est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm^2
- K** est un facteur correctif, égal à 1 si c'est une mesure du taux de comptage fourni par la sonde, égal à 0,1 si c'est une mesure de frottis

La mesure par frottis est nécessaire pour distinguer une contamination labile d'une contamination fixée, ou en présence de conditions défavorables (rayonnement ambiant perturbant la mesure, géométrie non adaptée à la mesure directe...).

La recherche de petits foyers de contamination est réalisée avec les mêmes techniques moyennant l'utilisation de sondes de petite taille.

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m^3)

Un système de prélèvement équipé d'un filtre et d'une échelle de comptage permet de détecter une éventuelle contamination atmosphérique et le cas échéant d'en suivre l'évolution.

Par ailleurs, une contamination par du radium-226 ou une simple rupture du confinement d'une source de radium-226 conduit à l'émanation de radon-222. La mesure du radon-222 dans l'air est recommandée dans de telles situations.

Ces mesures font appel à des instruments spécifiques et à des compétences spécialisées.

5. MOYENS DE PROTECTION

Le radium-226 et plusieurs descendants étant des émetteurs α , il est primordial de se prémunir contre le risque de contamination interne. Le risque d'exposition externe ne doit cependant pas être négligé du fait des émissions de rayonnements β , γ associées aux descendants.

Installation des locaux⁽³⁾

Les locaux dans lesquels le risque de dispersion de radium-226 existe (par exemple salles d'entreposage de paratonnerres) sont isolés, tenus à l'écart des circulations générales et aménagés :

- le revêtement des sols et des surfaces de travail sont en matériau facile à nettoyer ;

(2) Norme ISO 7503-1:1988 : « Évaluation de la contamination de surface. Partie 1 : Émetteurs bêta (énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV) et émetteurs alpha ».

(3) Ces dispositions ne visent pas les locaux pollués de sites historiques qui nécessitent un traitement spécifique.

- le vestiaire pour le personnel amené à intervenir est conçu et aménagé pour permettre la séparation, dans deux secteurs distincts, des vêtements de ville et des vêtements de travail (y compris les chaussures), et comporte douche et lavabo ainsi qu'un appareil de contrôle de la contamination ;
- l'entreposage de quantités importantes de matériaux contenant du radium-226 est organisé à distance des postes de travail ;
- les éviers susceptibles de recevoir des liquides contaminés sont clairement identifiés, comportent des robinets à commande non manuelle et sont reliés à des dispositifs de rétention (conteneur, cuves...).

Protection contre l'exposition externe

Trois actions majeures permettent de se protéger contre les risques d'exposition externe :

- diminuer le temps d'exposition aux rayonnements ;
- s'éloigner de la source de rayonnements ;
- interposer un ou plusieurs écran(s) entre la source de rayonnements et les personnes.

Les *tableaux X et XI* présentent les diminutions de débit d'équivalent de dose dues à des écrans constitués de différents matériaux. Les calculs d'épaisseur tiennent compte du *build up* dont on notera qu'il est important pour le radium-226.

▽ *Caractéristiques des écrans permettant de diminuer le débit d'équivalent de dose lié au radium-226 seul*

Tableau X

	Épaisseur d'eau	Épaisseur de béton*	Épaisseur de plomb
Diminution d'un facteur 10 du débit d'équivalent de dose	480 mm	165 mm	2 mm
Diminution d'un facteur 2 du débit d'équivalent de dose	300 mm	80 mm	0,7 mm

* Masse volumique = 2,35 g/cm³.

▽ *Caractéristiques des écrans permettant de diminuer le débit d'équivalent de dose lié au radium-226 à l'équilibre*

Tableau XI

	Épaisseur d'eau	Épaisseur de béton*	Épaisseur de plomb
Diminution d'un facteur 10 du débit d'équivalent de dose	650 mm	290 mm	42 mm
Diminution d'un facteur 2 du débit d'équivalent de dose	300 mm	120 mm	10 mm

* Masse volumique = 2,35 g/cm³.

Le port de gants est recommandé pour limiter le risque d'exposition externe lié aux dépôts cutanés.

Protection contre l'exposition interne

Compte tenu de sa radiotoxicité élevée, le risque d'exposition interne est particulièrement à considérer en cas de manipulation de radium-226 et de matériaux en contenant.

Ces opérations sont effectuées dans des locaux qui sont correctement ventilés et régulièrement nettoyés. Le captage des poussières à la source est à privilégier et l'évacuation du radon également à prendre en compte.

Lors de telles opérations, les équipements de protection individuelle (EPI) suivants sont utilisés :

- gants (il est rappelé qu'après manipulation, un lavage des mains est néanmoins nécessaire) ;
- vêtement de travail à manches longues, fermé ;
- protection des yeux.

Dans certaines interventions susceptibles de générer une dispersion atmosphérique de radium-226, des dispositifs de protection respiratoire doivent être disponibles.

6. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Régime administratif

En préalable à toute activité professionnelle conduisant à la détention et/ou l'utilisation de sources d'activité totale supérieure à 10⁴ Bq ou d'activité massique supérieure à 10 Bq/g, une autorisation délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique.

Toute découverte fortuite de source doit être déclarée à l'ASN.

Délimitation et contrôle des locaux

Les locaux dans lesquels le radium-226 est entreposé ou manipulé ainsi que les locaux attenants à ceux-ci sont délimités comme des zones contrôlées, surveillées ou non réglementées en fonction de l'activité radiologique utilisée, des dispositions de protection et de confinement mises en œuvre, et, le cas échéant, de la présence d'autres radionucléides.

Le zonage des locaux est justifié et formalisé sous forme d'un document à conserver (à joindre au document unique relatif aux risques professionnels). Il est formalisé par l'affichage de panneaux conformes aux dispositions réglementaires en vigueur.

Toute mesure appropriée est prise pour empêcher l'accès non autorisé aux zones dans lesquelles les matières radioactives sont entreposées et manipulées.

La délimitation des locaux prend en compte à la fois les risques d'exposition externe et interne liés aux matières entreposées et manipulées (*tableaux XII et XIII page suivante*).

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER

Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 heure
et, pour ce qui concerne les zones spécialement réglementées, débit d'équivalent de dose (DDD)

Zone non réglementée	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
<ul style="list-style-type: none"> ■ Dose efficace susceptible d'être reçue par un travailleur $E < 80 \mu\text{Sv}/\text{mois}$ ■ Contrôle de l'état de propreté radiologique si risque de contamination dans les zones réglementées attenantes 	$E < 7,5 \mu\text{Sv}$	$E < 25 \mu\text{Sv}$	$E < 2 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 2 \text{ mSv}/\text{h}$	$E < 100 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 100 \text{ mSv}/\text{h}$	$E > 100 \text{ mSv}$ ou $\text{DDD} > 100 \text{ mSv}/\text{h}$

Tableau XIII

EXPOSITION DES EXTRÉMITÉS (MAINS, PIEDS, CHEVILLES ET AVANT-BRAS)

Dose équivalente (H) susceptible d'être reçue en 1 heure

Zone non réglementée	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
Pas de valeur affichée	$H < 0,2 \text{ mSv}$	$H < 0,65 \text{ mSv}$	$H < 50 \text{ mSv}$	$H < 2,5 \text{ Sv}$	$H > 2,5 \text{ Sv}$

Les contrôles techniques réglementaires de radioprotection sont présentés dans le [tableau XIV](#); les appareils de mesure recommandés pour réaliser ces contrôles sont donnés au [tableau IX](#).

▽ Contrôles réglementaires

Tableau XIV

	Mise en œuvre
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	En continu ou au moins mensuelle
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	

En complément de ces contrôles, les bonnes pratiques suivantes sont recommandées :

- contrôle régulier de la contamination surfacique sur les matériels, écrans, sols... ;
- en cas d'utilisation de hotte ventilée : vérification régulière de l'état radiologique du matériel et des filtres ;
- contrôle de la contamination atmosphérique au lieu d'intervention si un risque de contamination atmosphérique est identifié ou en cas de dispersion accidentelle ;
- mesure de radon-222 ;
- vérification de la non-contamination corporelle externe.

Déchets

Les situations héritées du passé (découvertes de sources, sites pollués) conduisent à gérer l'élimination de sources/matériaux contenant du radium-226. Ces opérations sont réalisées par des organismes spécialisés sous le contrôle de l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) ; les déchets contenant du radium-226 sont éliminés dans des filières autorisées. On notera en particulier qu'aucun rejet direct n'est autorisé.

Transports routiers

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses (matières radioactives : classe 7). Pour le radium-226, cette réglementation ne s'applique pas si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à $10 \text{ Bq}/\text{g}$ ou si l'activité totale est inférieure à 10^4 Bq .

Si les deux seuils d'activité massique et d'activité par envoi sont dépassés, le transport est soumis aux dispositions réglementaires en vigueur.

Se référant au règlement de transport des matières radioactives⁽⁴⁾, la démarche de base est ici décrite de manière succincte par trois prescriptions générales.

L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans ces règlements. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée ([tableau XV](#)). Un niveau d'activité de

(4) Règlement de transport des matières radioactives, normes de sûreté de l'AIEA en vigueur.

référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le radium-226 à l'équilibre, la valeur de A2 vaut 3 GBq.

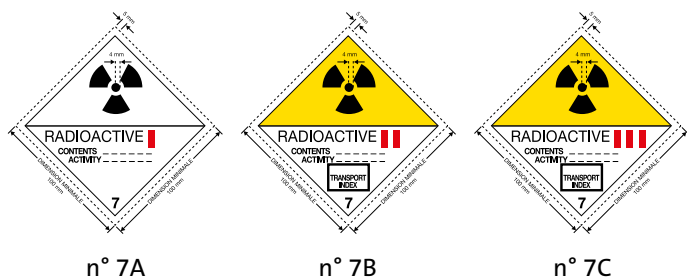
▽ *Classement des colis selon l'activité en radium-226 à l'équilibre (exemple de contenu solide)*

Tableau XV

Type de colis	Activité mise en jeu pour le radium-226	Caractéristiques imposées au colis
Colis exceptés	< 3 MBq (< A2/1000)	Pas de norme de résistance
Colis de type A	< 3 GBq (< A2)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	> 3 GBq (> A2)	Étanche et blindé

La règle générale qui s'applique pour la contamination non fixée sur les surfaces externes d'un colis est d'être maintenue aussi faible que possible et en tout état de cause de ne pas dépasser en moyenne sur 300 cm² 0,4 Bq/cm² pour les émetteurs α et 4 Bq/cm² pour les émetteurs β/γ .

L'expéditeur est également responsable de la signalisation des colis qui est destinée à limiter les risques d'exposition des personnes du public ou des travailleurs en cours de transport. Cette signalisation est effectuée par l'une des étiquettes 7A, 7B ou 7C représentées ci-dessous, choisie en fonction des débits d'équivalent de dose mesurés autour du colis (tableau XVI).



▽ *Correspondance entre la catégorie de l'étiquette apposée sur le colis, l'indice de transport et le le débit d'équivalent de dose (DDD)*

Tableau XVI

Indice de transport (IT) ⁽⁵⁾	Débit d'équivalent de dose en tout point de la surface	Étiquette
0	DDD ≤ 5 μSv/h	I – BLANCHE
Plus de 0 mais pas plus de 1	5 μSv/h < DDD ≤ 500 μSv/h	II – JAUNE
Plus de 1 mais pas plus de 10	500 μSv/h < DDD ≤ 2 mSv/h	III – JAUNE
Plus de 10	2 mSv/h < DDD ≤ 10 mSv/h ⁽⁶⁾	III – JAUNE et transport exclusif

(5) IT = intensité de rayonnement maximale à 1 m de tout point situé à la surface du colis (en mSv/h) x 100 x k où k est un coefficient qui dépend de la géométrie du colis avec k = 1 pour les colis dont la plus grande section ne dépasse pas 1 m².

(6) L'intensité en tout point de la surface externe ne peut dépasser 2 mSv/h que si le véhicule est équipé d'une enceinte qui, dans les conditions de transport de routine, empêche l'accès des personnes non autorisées à l'intérieur de l'enceinte, des dispositions sont prises pour immobiliser le colis à l'intérieur de l'enceinte du véhicule et il n'y a pas d'opérations de chargement/déchargement entre le début et la fin de l'expédition.

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL

Classement

Tandis que la délimitation des zones de travail est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé par l'étude des postes de travail.

L'évaluation de la dose prévisionnelle (organisme entier et cristallin, peau, extrémités si nécessaire) annuelle, prenant en compte les expositions externe et interne aux différents postes occupés, permet de classer les travailleurs exposés en deux catégories, A et B. Les travailleurs pour lesquels la dose prévisionnelle dans les conditions habituelles de travail, incluant les situations incidentelles raisonnablement prévisibles, dépasse la limite réglementaire pour le public sont considérés comme étant exposés aux rayonnements ionisants. Leur classement n'est pas fondé sur l'affectation habituelle ou non en zone réglementée (surveillée ou contrôlée) mais sur un niveau de dose susceptible d'être atteint.

Parmi les travailleurs exposés, ceux susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv/an (la limite annuelle de dose efficace étant de 20 mSv) ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition fixées pour les extrémités (500 mSv), la peau (500 mSv) ou le cristallin (150 mSv⁽⁷⁾) sont classés par l'employeur en catégorie A après avis du médecin du travail (tableau XVII); ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

La femme enceinte, l'étudiant ou apprenti de moins de 18 ans ne peuvent être affectés à un poste impliquant un classement en catégorie A.

▽ *Critères de classement des travailleurs exposés*

Tableau XVII

	Dose efficace corps entier	Dose équivalente mains, avant-bras, pieds, chevilles	Dose équivalente à tout cm ² de la peau	Dose équivalente au cristallin
Travailleurs exposés de catégorie A	> 6 mSv sur 12 mois consécutifs	> 150 mSv	> 150 mSv	> 45 mSv
Travailleurs exposés de catégorie B	≤ 6 mSv sur 12 mois consécutifs	≤ 150 mSv	≤ 150 mSv	≤ 45 mSv

Formation du personnel

Tous les personnels, classés ou non, devant intervenir en zone réglementée bénéficient d'une formation à la radioprotection, organisée par l'employeur et renouvelée au moins tous les trois ans, portant sur les risques d'exposition externe et interne, sur les procédures générales de radioprotection en vigueur ainsi que sur les règles de protection contre les rayonnements ionisants.

(7) Attention : La valeur limite actuelle de 150 mSv/an devrait être abaissée à 20 mSv/an suite à la révision des normes de base européennes (directive 2013/59/EURATOM).

La formation est adaptée aux risques spécifiques du radium-226, aux procédures de radioprotection propres au poste de travail occupé ainsi qu'aux règles de conduite à tenir en cas de situation anormale.

Une attention particulière est portée à la formation des travailleurs temporaires, des nouveaux entrants et des femmes en âge de procréer. Une formation spécifique peut être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale des travailleurs exposés

Les points importants sont les suivants :

- la surveillance médicale est renforcée pour les travailleurs exposés classés en catégorie A et B, avec en catégorie A une surveillance au moins une fois par an ;
- le médecin du travail peut choisir de prescrire des examens complémentaires ;
- en cas de grossesse, il appartient au médecin du travail d'évaluer si la femme enceinte peut rester au poste de travail ; la dose de l'enfant à naître reste dans tous les cas inférieure à 1 mSv entre la déclaration de grossesse et l'accouchement ;
- il est interdit d'affecter ou de maintenir une femme allaitante à un poste de travail comportant un risque d'exposition interne à des rayonnements ionisants ;
- la carte individuelle de suivi médical est remise par le médecin du travail (contacter l'IRSN : www.siseri.com) ;
- l'attestation d'exposition professionnelle est établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche individuelle d'exposition aux rayonnements ionisants.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

Dosimètre passif individuel :

- Catégorie A : période de port mensuelle
- Catégorie B : période de port mensuelle ou trimestrielle

Compte tenu de ses descendants, la dosimétrie des extrémités (de type bague) est fortement recommandée pour toute manipulation d'objets contenant du radium-226 et, en tout état de cause, obligatoire lorsque la dose équivalente aux extrémités est susceptible de dépasser 50 mSv par an.

Exposition interne

L'exposition interne est évaluée par analyse radiotoxicologique des urines (prélèvement sur 24 heures). Les examens sont réalisés immédiatement après chaque campagne de manipulations.

Dans le cas de manipulation régulière de radium-226, l'ISO (International Standard Organisation) recommande de ne pas dépasser 180 jours entre deux examens urinaires⁽⁸⁾.

Le dosage fécal est également possible mais reste plus délicat à interpréter (bruit de fond important dû à l'apport alimentaire).

De même, une mesure anthroporadiométrique de la quantité retenue après incorporation peut être réalisée dans les suites immédiates d'une contamination, en utilisant les rayonnements gamma des proches descendants. On note que lorsque le radium-226 est incorporé seul, les descendants générés au sein de l'organisme après l'incorporation sont pris en compte (*tableau VII*). Lorsque le radium-226 est incorporé avec ses descendants, les valeurs de dose efficace par Bq de radium-226 incorporé tiennent compte de la DPUI de chacun des descendants en considérant leurs activités respectives en fonction de l'âge de la source (*tableau VIII*).

En cas de résultat positif, le médecin du travail demandera des contrôles ultérieurs pour suivre l'évolution du niveau de l'exposition interne ; il analysera les circonstances de l'exposition avec l'appui de la personne compétente en radioprotection (PCR).

8. CONDUITE À TENIR EN CAS D'INCIDENT/ACCIDENT

Ce chapitre vise le cas d'incident/accident survenant suite à une erreur de manipulation ou une circonstance inattendue concernant une source / des matériaux contenant ou susceptibles de contenir du radium-226.

Ces situations peuvent concerner du personnel local et des intervenants. En pratique cependant, une fois la découverte de la source / des matériaux concernés, le personnel non impliqué reste distant et seuls les intervenants sont concernés par le cas d'incident/accident.

Si nécessaire, le principe général reste que le traitement de l'urgence vitale médico-chirurgicale prime sur toute action de décontamination.

Dès la découverte de l'événement

- Suivre les consignes de sécurité affichées.
- Avertir le personnel et le faire évacuer.
- Alerter la personne compétente en radioprotection, le responsable de l'installation et le médecin du travail.
- Engager au plus tôt les opérations de décontamination des personnes.
- Contacter, si nécessaire, l'IRSN pour un appui technique (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

(8) Norme NF ISO 20553:2006 : « Surveillance professionnelle des travailleurs exposés à un risque de contamination interne par des matériaux radioactifs ».

Contamination des locaux et/ou du matériel

■ Déterminer par des mesures (voir *tableau IX*) l'étendue de la zone contaminée, délimiter et baliser un périmètre de sécurité. Par ailleurs, une mesure du radon-222 peut être utile pour compléter les investigations.

■ Procéder à des contrôles (voir *tableau IX*) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle en sortie de la zone concernée.

Toute contamination de locaux et/ou de surfaces de travail doit conduire à rechercher une contamination éventuelle des intervenants.

Les personnes intervenant dans des locaux suspectés ou avérés contaminés portent, *a minima*, des gants, une surtenuie et des surbottes (étanches en prévision de déversement de liquide); dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires est recommandé.

Exposition externe et interne d'une personne

Exposition externe

■ Le cas échéant, transmettre les dosimètres passifs pour exploitation en urgence et pour comparaison éventuelle avec les résultats des dosimètres des autres personnels impliqués.

■ Réaliser une première investigation en vérifiant le débit d'équivalent de dose de la source et le temps de présence des personnels impliqués.

Contamination cutanée

Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures (éventuellement, les sécrétions nasales).

■ Faire ôter les vêtements contaminés.

■ Procéder à la décontamination par un lavage à l'eau savonneuse de préférence (ou un produit équivalent non abrasif) sans irriter la peau afin de ne pas favoriser le passage transcutané du contaminant.

■ Contrôler après la décontamination et, si nécessaire, recommencer la procédure.

■ Si une contamination cutanée persiste, un pansement étanche peut être placé sur la zone concernée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

Il est impératif d'obtenir la décontamination aussi complète que possible de façon à éviter une contamination interne induite.

Toute contamination cutanée d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

Toute contamination du personnel doit être analysée car elle peut être le seul signe apparent d'une contamination d'un local ou d'une zone.

Contamination oculaire

■ Laver abondamment sous l'eau à température ambiante.

■ Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.

Toute contamination oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

Contamination interne

Cette situation impose l'intervention immédiate de la PCR et du médecin du travail qui, si nécessaire, feront appel à un service spécialisé ou à l'IRSN.

Il est recommandé de :

■ déterminer l'activité manipulée ;

■ faire débiter immédiatement les prélèvements urinaires (sur une période de 24 heures) pour examen par l'IRSN ou par un organisme agréé. Des prélèvements nasaux sont recommandés pour analyse du mucus nasal.

Si le résultat est positif, le médecin du travail demande des mesures ultérieures pour suivre l'évolution de la contamination interne.

Le traitement d'urgence doit être effectué sous contrôle médical (le plus tôt possible et de préférence dans les 2 heures qui suivent la contamination). Le traitement préconisé est l'administration de chlorure d'ammonium. Contacter l'IRSN pour plus d'information (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée (inhalation de radium-226 seul sous forme particulaire (5 µm) – type M)

Le calcul de la dose efficace engagée s'effectue de la manière suivante :

$$I = A_m / F(t) \\ E(Sv) = I(\text{Bq incorporé}) \times \text{DPUI} (\text{Sv/Bq incorporé})$$

Avec :

E = dose efficace engagée

I = activité incorporée au jour de la contamination

A_m = activité mesurée (soit en excrétion, soit en rétention) au jour J après la contamination

F(t) = fraction excrétée ou retenue au jour J pour 1 Bq incorporé

DPUI = dose efficace engagée par unité d'incorporation

Le *tableau XVIII* présente les valeurs d'excrétion urinaire évaluées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) qui sont utilisées pour interpréter les valeurs d'activités mesurées.

▽ Valeurs d'excrétion urinaire, en Bq par Bq incorporé, pour l'inhalation de radium-226 seul sous forme particulaire (5 µm) de type M

Tableau XVIII

Temps après l'incorporation (j)	Excrétion urinaire journalière
1	$1,6 \times 10^{-3}$
2	$3,1 \times 10^{-4}$
3	$2,1 \times 10^{-4}$
4	$1,5 \times 10^{-4}$
5	$1,1 \times 10^{-4}$
6	$7,7 \times 10^{-5}$
7	$5,7 \times 10^{-5}$
8	$4,3 \times 10^{-5}$
9	$3,4 \times 10^{-5}$
10	$2,7 \times 10^{-5}$

Exemple numérique

L'analyse des urines des 24 heures prélevées dans les trois jours (J1, J2 et J3) suivant la contamination donne les résultats suivants :

$$A_{J1} = 3,2 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J2} = 0,5 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J3} = 0,45 \text{ Bq sur 24 heures}$$

Suivant le *tableau XVIII*, l'évaluation de l'activité inhalée sur la base des mesures d'excrétion à J1, J2 et J3 donne :

$$I_{J1} = 3,2 / (1,6 \times 10^{-3}) = 2,0 \times 10^3 \text{ Bq}$$

$$I_{J2} = 0,5 / (3,1 \times 10^{-4}) = 1,6 \times 10^3 \text{ Bq}$$

$$I_{J3} = 0,45 / (2,1 \times 10^{-4}) = 2,1 \times 10^3 \text{ Bq}$$

L'activité incorporée est égale, en première approche, à la moyenne des trois valeurs de I :

$$I = 1,9 \times 10^3 \text{ Bq}$$

Ce qui donne en prenant la DPUI correspondante (*tableau VII*) :

$$E = (2,2 \times 10^0) \times (1,9 \times 10^3) = 4180 \text{ µSv}$$

Déclarations à effectuer

Tout incident ou accident est consigné dans le registre d'hygiène et de sécurité et fait l'objet d'une information au CHSCT.

Tout accident du travail est déclaré par l'employeur auprès de la caisse primaire d'assurance maladie.

Tout événement significatif répondant aux critères définis dans les guides de l'ASN⁽⁹⁾ (notamment le critère 1 relatif à la protection des travailleurs) est déclaré, dans les meilleurs délais, par l'employeur auprès de la division territoriale compétente de l'ASN.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail est également prévenu, ainsi que l'IRSN qui pourra apporter son support au médecin du travail.

Tout incident ou accident intervenant lors d'un transport (notamment en cas de perte ou détérioration du colis) est signalé à l'ASN, au préfet compétent et à l'IRSN.

(9) – Guide n° 11 de l'ASN (ex. DEU/03) relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection hors installations nucléaires de base et transports de matières radioactives.

– Guide ASN relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux INB et au TMR.

Cette fiche a été élaborée par un groupe de travail animé par l'INRS et l'IRSN auquel ont participé des experts de l'AP-HP, CEA, CH de Poissy-St-Germain, CNRS, INSERM et la DGT.

Les experts qui ont plus particulièrement contribué à cette fiche sont :

- Marc Ammerich (CEA),
- Patricia Frot (INSERM),
- Denis-Jean Gambini (AP-HP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St-Germain),
- Thierry Lahaye (DGT),
- Patrick Moureaux (INRS),
- Pascal Pihet (IRSN),
- Alain Rannou (IRSN).



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • www.inrs.fr • info@inrs.fr



Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
31, avenue de la Division-Leclerc 92260 Fontenay-aux-Roses
Tél. 01 58 35 88 88 • www.irsn.fr